

毫米波调频步进雷达运动补偿方法研究

王桂丽^{1,2}, 李兴国¹

(1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094; 2. 安徽师范大学物理与电子信息学院, 安徽芜湖 241000)

[摘要] 毫米波调频步进(chirp-step frequency, Chirp-SF)雷达是一种距离高分辨率雷达,但是存在严重的距离速度耦合问题,所以实现运动目标的距离高分辨必须进行运动补偿。文章提出了一种把脉冲多普勒(Pulse Doppler)测速和基于 Chirp-SF 信号的时域相关法测速相复合的方法。仿真结果表明该方法测速精度高,算法简单,速度快。

[关键词] 毫米波雷达;调频步进;多普勒;运动补偿

[中图分类号] TN958.6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)07-0088-04

1 前言

提高距离分辨率是现代雷达应用的一个重要研究方向,而获得高分辨距离像,必须采用大带宽信号,因而频率步进信号近年来得到了较深入的研究^[1]。雷达采用简单的频率步进信号时,在距离分辨率一定的前提下,要提高数据率,则必须增加频率步进量,而频率步进量又受发射脉冲时宽的限制。为解决这一矛盾,用线性调频信号作为频率步进信号的子脉冲,子脉冲的中心频率是步进的,即可构成调频步进(chirp-step frequency, Chirp-SF)信号。相对于简单频率步进信号,调频步进信号能够保持步进频率信号能量和总带宽不变,减少步进阶梯数;在提高系统数据率的同时,减小相同速度情况下目标运动带来的距离走动和目标伪峰。调频步进信号是一种合成信号,它把线性调频信号和频率步进信号这两种高分辨率信号结合起来。然而调频步进信号仍然存在严重的距离-速度耦合,因此要获得高分辨距离像,还要进行运动目标速度补偿。

笔者提出了交叉发射调频步进信号和脉冲多普勒信号的方法,发射信号如图 1 所示。用 Chirp-SF 信号生成高分辨一维距离像,存在严重的距离-速

度耦合。毫米波信号多普勒频移大,故用脉冲多普勒信号测速精度高,但测速范围小;而基于 Chirp-SF 信号的时域相关法测速范围大,但精度低。笔者提出将二者复合,使得测速精度高,测速范围大,可以对 Chirp-SF 信号进行精确的速度补偿,形成高精度的一维距离像。信号处理流程如图 2 所示。

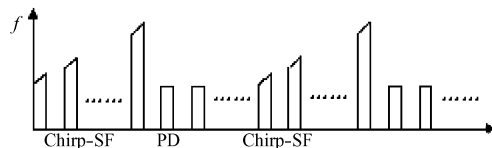


图 1 交替发射的 Chirp-SF 信号和 PD 信号

ig.1 Transmitted Chirp-SF signal and PD signal by turns

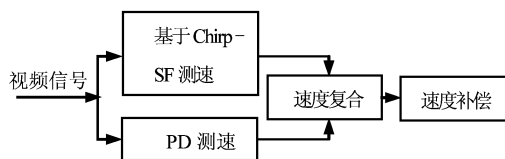


图 2 复合测速流程图

Fig.2 Flow chart of compound measurement of velocity

2 Chirp-SF 信号数学形式及其多普勒效应

2.1 Chirp-SF 信号数学形式

设调频步进信号子脉冲的个数为 N , 调频带宽

[收稿日期] 2007-02-05; **修回日期** 2007-05-28

[基金项目] 安徽师范大学青年科学基金资助项目(2006xqn60)

[作者简介] 王桂丽(1979-),女,安徽太和县人,南京理工大学博士研究生,主要研究方向为信号处理与目标识别;李兴国(1940-),男,云南嵩明县人,教授,博士生导师,主要研究方向为毫米波精确探测及目标识别技术

$\left[-\frac{c}{4\Delta f\Delta T}, \frac{c}{4\Delta f\Delta T}\right]$ 。从处理的实时性和速度分辨率来考虑,增大 ΔT ,可以提高算法的采样分辨率和测速精度,但同时减小了无模糊测速范围。如果 ΔT 较小,可以增加无模糊测速范围,减小计算量,但会降低测速精度,增加了统的成本和复杂度。考虑到工程实现,取 ΔT 为 4 个帧周期时间。代入参数得速度分辨率 $\Delta v = 73.2 \text{ m/s}$,测速范围为 $(-586 \text{ m/s}, 586 \text{ m/s})$ 。测速范围大,但速度分辨率低。

3.2 PD 测速^[7]

发射一组 N_2 个脉冲序列,载频为 f_0 ,则发射脉冲表达式为 $s(t) = \sum_{i=1}^{N_2} \text{rect}\left[\frac{t-iT_r}{T_p}\right] \exp(j2\pi f_0 t)$; 回波信号经过混频,及归一化处理得视频采样信号为 $x(i) = \exp(j2\pi i T_r f_d)$, $f_d = \frac{2v}{\lambda} = \frac{2vf_0}{c}$, 式中, λ 为载波波长, f_d 为多普勒频移。

对回波信号作傅立叶变换提取多普勒频率:

$$|Y(k)| = \left| \frac{\sin\left[\pi\left(N_2 T_r f_d - k\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(T_r f_d - \frac{k}{N_2}\right)\right]} \right|, \text{ 所以当 } k =$$

$\text{round}(N_2 T_r f_d)$ 时,回波达到最大值;测速精度 $f_d = \frac{1}{N_2 T_r}$, $\Delta v = \frac{c}{2N_2 f_0 T_r}$ 无模糊测速范围

$$\left[-\frac{c}{4f_0 T_r}, \frac{c}{4f_0 T_r}\right]。$$

设雷达发射 PD 信号参数:载频 $f_0 = 95 \text{ GHz}$,脉冲数 $N_2 = 64$,脉冲宽度 $T_p = 1 \mu\text{s}$,脉冲周期 $T_r = 20 \mu\text{s}$ 。代入参数,得速度分辨率 $\Delta v = 1.2 \text{ m/s}$,满足一次相位误差补偿的要求;测速范围为 $(-39.5 \text{ m/s}, 39.5 \text{ m/s})$ 。可见速度分辨率较高,但测速范围小,存在严重的测速模糊。因此必须把基于 Chirp-SF 的时域相关法测速与 PD 测速的方法结合起来,才能精确得到速度值。

3.3 复合测速

设时域相关法测速和 PD 测速测得的速度分别为 v_1, v_2 ,则实际速度值为

$$v = v_2 + kf_r c/2f_0 \quad (6)$$

式中, k 为任意整数; f_r 为发射多普勒脉冲信号的频率, $f_r = 1/T_r$,令 $v_1 = v_2 + kf_r c/(2f_0)$,则得 $k = \text{round}\left[\frac{2f_0(v_1 - v_2)}{f_r c}\right]$,把 k 值代入式(6),求出速度精确值,实现距离高分辨。由此得出速度分辨率为

1.2 m/s ,最大测速范围为 $(-586 \text{ m/s}, 586 \text{ m/s})$,显然这满足 3.1 节所述的速度补偿要求。

4 仿真实验

仿真目标散射点分别在 $542 \text{ m}, 543 \text{ m}, 543.5 \text{ m}$ 处,图 3、图 4 分别表示目标速度为 $0 \text{ m/s}, 180 \text{ m/s}$ 时的距离像,图 5 为目标以 180 m/s 的速度运动时,用

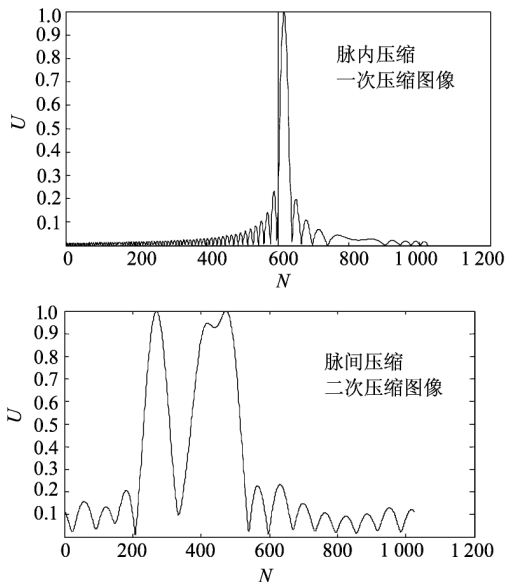


图 3 距离像 ($v=0 \text{ m/s}$)

Fig.3 Range profiles ($v=0 \text{ m/s}$)

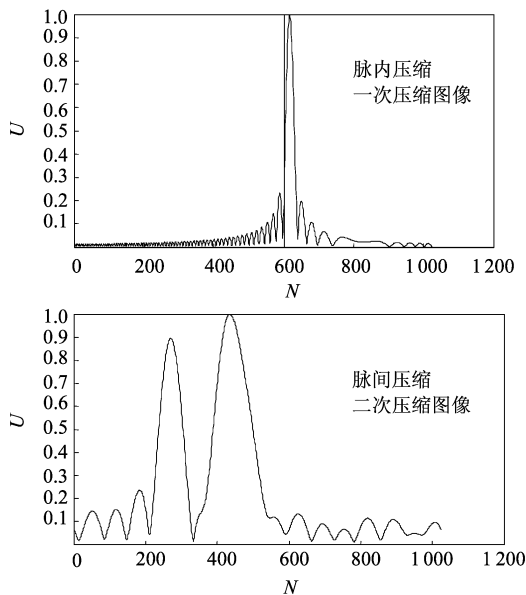


图 4 距离像 ($v=180 \text{ m/s}$)

Fig.4 Range profiles ($v=180 \text{ m/s}$)

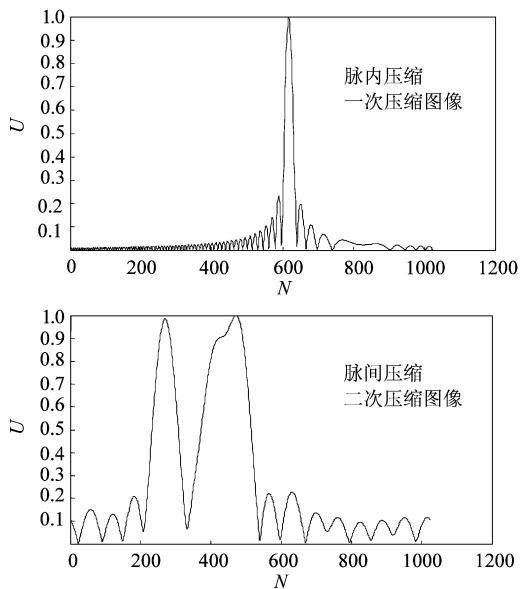


图5 速度补偿后的距离像($v = 180 \text{ m/s}$)

Fig.5 Range profiles after motion compensation
($v = 180 \text{ m/s}$)

复合测速方法进行速度补偿后的距离像。在图3至图5中,纵坐标是回波信号经压缩后输出的归一化电压,用 U 表示;横坐标表示 IDFT 变换点数(对应目标的距离),用 N 表示。从图3、图4看出,速度对一次压缩脉冲主瓣宽度和峰值基本没有影响,这说明 Chirp 信号对目标运动不敏感;但是二次压缩时,明显地有峰值走动,3个散射点,只有2个峰值,并且峰值降低,旁瓣电平增加,这将给后端的测距、目标识别等带来误差。经过速度补偿后,如图5所示,

消除了峰值走动,旁瓣电平也被抑制,与图3基本一致。由于该方法同时利用了第一帧和第4帧的信号来实现速度补偿,因此进行第一次速度估计需要通过发射4帧信号来实现,但以后每次速度估计可在每帧发射信号时间内完成,当然也可以根据工程需要,适当修改时间 ΔT 。可见这种测速方法完全可以满足一次补偿误差的要求,速度补偿效果好,并且算法简单,处理时运行速度快。

5 结语

文章提出了一种把 PD 测速和基于 Chirp-SF 信号的时域相关法测速相复合的方法,它对毫米波目标一维距离像进行精确的运动补偿。仿真实验证明,这种方法的补偿效果好、速度快。利用该方法得到的目标一维距离像,距离分辨率高,可以应用于对毫米波雷达目标进行精确识别,测距等处理。

参考文献

- [1] 毛二可,龙腾,韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理[J]. 航空学报,2002,6(22):16-25
- [2] 王磊,彭稳高,陈图强. 调频步进信号处理方法探讨[J]. 现代雷达,2002,3(6):60-62
- [3] 向敬成,张明友. 雷达系统[M]. 北京:电子工业出版社,2001
- [4] 张群,张涛,张守宏. 运动目标环境下的调频步进信号分析[J]. 西安电子科技大学学报,2001,28(2):220-224
- [5] 龙腾,毛二可. 调频步进雷达信号分析与处理[J]. 电子学报,1998,12(1):84-88
- [6] 刘静,李兴国,李跃. 毫米波 Costas 编码雷达运动目标一维距离像运动补偿[J]. 红外与毫米波学报,2005,24(5):344-347
- [7] 毛士艺. 脉冲多普勒雷达[M]. 北京:国防工业出版社,1990

Study on motion compensation method for MMW Chirp-SF radar

Wang Guili^{1,2}, Li Xingguo¹

(1. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. The College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

[Abstract] MMW Chirp-SF radar is a kind of radar to get high range resolution, but the problem of range-velocity coupling is serious. So it is necessary to carry out the motion compensation in order to increase the range resolution of moving target. This paper puts forward a velocity measurement method compounding the Pulse Doppler velocity measurement and the time-domain correlation method based on Chirp-SF signal. The simulations results show that this method can be used to measure velocity accurately with simple arithmetic and high speed.

[Key words] MMW radar; Chirp-SF; Doppler; motion compensation